

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06383

研究課題名（和文）過酷環境で動作する窒化物半導体集積エレクトロニクスの検討

研究課題名（英文）GaN-based integrated electronics operable in harsh environment

研究代表者

岡田 浩（Okada, Hiroshi）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：30324495

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：青色LEDに加えてパワーエレクトロニクス分野での応用が期待される窒化物半導体（GaN）は、ワイドギャップ半導体の特性をもつなど、シリコン集積回路では困難な高温など過酷環境で動作可能なエレクトロニクス実現のポテンシャルを有している。本研究では、過酷環境で動作するトランジスタや集積回路実現に必須である金属/絶縁体/半導体（MIS）構造の形成技術を開発するとともに、試作したGaN トランジスタの高温動作特性を報告した。また、イオン注入技術などモノリシック集積回路を検討し、GaN基板上にモノリシックに作製したE/D型インバータ回路の動作を世界で初めて報告した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Internet-of-Things（IoT）の時代において、様々な装置・機器に必須である電源の効率化、小型化は重要であり、窒化物半導体デバイスはそのキーデバイスとしての要求が高まっている。また、センシングに基づいた制御は工学の基礎であり、高温のエンジンルームなどにもセンシング対象を広げることは持続可能な社会実現にも大きな寄与をもたらす。本研究はこうしたエレクトロニクスの新領域開拓に有用な窒化物半導体の特性を生かした過酷環境応用に重要な課題である絶縁ゲート構造や集積回路技術の提案、開発を行うとともに作製したデバイスの特性評価による有用性を報告するなど意義のある成果を報告できた。

研究成果の概要（英文）：Wide band-gap nitride semiconductors, which attracts attention for power electron devices adding to the blue LEDs, possess potential to harsh environment application including high temperatures, where the Si-based integrated circuits are hard to operate. In this study, the formation technology of metal/insulator/semiconductor (MIS) for GaN-based transistors and an integrated circuit for the harsh environment are developed and the electrical characteristics of the fabricated transistors in high temperatures are reported. Furthermore, process technologies for a monolithic integrated circuit including ion-implantation are investigated. Operation of E/D type inverter fabricated monolithically on GaN substrate is also reported.

研究分野：半導体工学

キーワード：窒化物半導体 集積回路 プロセス技術 過酷環境エレクトロニクス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

センシング技術は今後の爆発的な展開が予測される Internet-of-Things (IoT) の広がりとともに益々重要になり、その適用範囲の拡大が求められる。オペアンプ等の半導体集積回路とセンサの一体化は、高感度・高機能センシングを実現しているが、シリコン (Si) を基本材料とする集積回路は常温～130℃ など生活環境に近い状況の使用が前提であり、高温、放射線環境下での高感度センシングでは、Si (バンドギャップ 1.1 eV) 中の熱励起キャリアの顕在化や照射効果による誤動作など、物理的な限界がある。これに対し、Si の3倍に及ぶ広いバンドギャップ (3.4 eV) を有し、化学的・機械的に安定な性質を有する GaN などの窒化物半導体材料は、過酷な環境で動作する半導体デバイス材料として有望である。これまでに、青色 LED をはじめ、紫外線受光素子、高電子移動度トランジスタ (HEMT) など、単体デバイスの開発が行われている。これらのセンサやトランジスタを GaN 基板上にモノリシックに集積する技術が確立されれば、過酷環境でのセンシング技術に大きな貢献ができる。しかし、窒化物半導体集積回路の研究については、国内外で小規模の集積回路の動作が報告され始めているものの、自由度の高い集積回路プロセスが実施できる研究機関は世界的にも限られており、本課題で構想するようなセンサとのモノリシック集積化の実証報告はまだない。また、商用化が始まった GaN 系トランジスタはゲート構造に金属/半導体 (MS) 構造を用いており、高温動作には安定性の優れた金属/絶縁体/半導体 (MIS) 構造のトランジスタの集積化にも取り組む必要があった。

2. 研究の目的

申請者は GaN など窒化物半導体を用いたトランジスタや、ガスセンサ、紫外線センサ、ならびに材料の耐放射線性の評価の研究を通して高温・放射線環境などの過酷な環境で動作する電子デバイスとして窒化物半導体の有用性を見出ししてきた。センサや、信号処理回路を集積化した窒化物半導体モノリシック集積回路が実現できれば、過酷な環境で必要とされるセンシングや制御の革新的な進歩につながる。本研究では、過酷な環境で動作をする窒化物半導体の耐環境性モノリシック集積回路の実現のための新規の絶縁体/半導体界面形成技術による絶縁ゲート形トランジスタ開発と、300℃ の高温下など過酷環境での集積回路の動作実証を目的とする。

3. 研究の方法

窒化物半導体材料の集積エレクトロニクスへの展開は先駆的な取り組みであり、本研究では新たな集積回路技術として取り組むべき課題として以下に取り組む。

- (1) 新規技術による絶縁体/GaN 界面形成と、MIS ゲート形トランジスタの作製・評価
- (2) シリコン集積回路技術を応用した GaN 集積デバイスの作製と有用性の検証
- (3) 窒化物半導体モノリシック集積回路の作製・評価と、高温での耐環境性回路動作の検証

以上の検討から、過酷環境で動作する窒化物半導体集積エレクトロニクスの基盤となるデバイス作製技術を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 新規技術による絶縁体/GaN 界面形成と、MIS ゲート形トランジスタの作製・評価の検討において、本研究では SiO₂ 膜の形成に独自に開発した基底状態酸素原子を用いた化学気相堆積 (Atomic Species Enhanced Chemical Vapor Deposition: ASECV) 法を用いた。ASECV 装置の概略図を図 1 に示す。化合物半導体のデバイスプロセスでは、SiO₂ の堆積には高周波プラズマにより直接的に化学反応を励起するプラズマ CVD 法が用いられるが、本研究で開発した ASECV

法では試料表面が高エネルギーのプラズマに直接的にさらされるため、過度に反応性の高いイオン種などに半導体表面へのダメージ導入回避が困難である。開発した ASECVD 法では、試料表面から離れた領域に表面波モードプラズマを発生させ、プラズマ中のイオン種を除去し、堆積反応を支援するのに十分な程エネルギーの基底状態酸素原子を試料表面に導入し、低いエネルギーで SiO_2 堆積反応が可能な有機化合物原料を用いて堆積を行う。

図 2 に GaN MOS 構造の絶縁特性を示す電流密度-電界 (J-V) 特性の測定結果の例を示す。絶縁膜に印加された電界 6 MV/cm においても 10^{-8} A/cm² の低い電流密度が観測された。この値は予備実験で Si 基板上に形成した SiO_2 膜のリーク電流特性とほぼ一致しており、GaN 基板上においても基板の影響なく良質な絶縁膜が得られていることを示している。また、このリーク電流特性は、最も特性が優れているといわれる単結晶 Si の熱酸化 SiO_2 に比べると劣るものの、CVD 法により堆積した膜では他の報告の中でもトップクラスの低いリーク電流特性であり、ASECVD 法により GaN 半導体に対して良質な絶縁膜が形成可能であることが示された。この $\text{SiO}_2/\text{n-GaN}$ の MOS 構造の高周波の容量-電圧 (C-V) 特性を評価したところ、理想曲線に近い絶縁体/半導体界面の形成を示唆する結果が得られた。Terman 法を用いて簡易的に概算した界面準位密度は 10^{11} cm⁻²eV⁻¹ 位の低い値が見積もられ、絶縁ゲート型トランジスタのゲート絶縁膜として良好な動作が期待できる特性であることが分かった。

AlGaIn/GaN の絶縁ゲート型トランジスタ (MOS トランジスタ) を作製し、その特性評価ならびに高温での動作特性の検証を行なった。トランジスタの酸化膜形成には、先に述べた ASECVD 法を用いて堆積を行なった。図 3 に示すように、良好な飽和特性ならびにゲート制御特性を得ることができた。トランジスタの閾値は、AlGaIn 層やゲート酸化膜の構造から計算されるゲート容量にほぼ一致しており、先に示した C-V 特性の結果からも良好なゲート制御特性が得られていることがトランジスタ構造においても実証された。試料ステージ温度が可変のプローブシステムを用いて、同じトランジスタを 200°C で動作させた時の特性を図 3 の実線で示す。温度上昇によりドレイン電流が減少しているが、ゲート制御性を含むトランジスタ特性が得られていることが分かる。ドレイン電流の減少は半

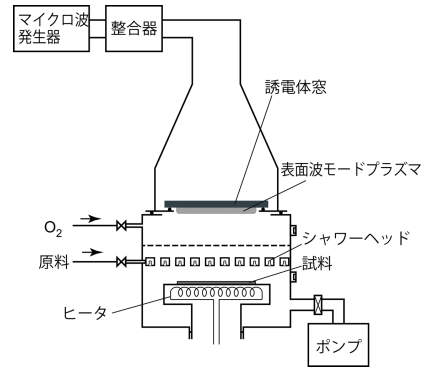


図 1: 基底状態原子を用いた化学気相堆積 (ASECVD) 法の装置概念図

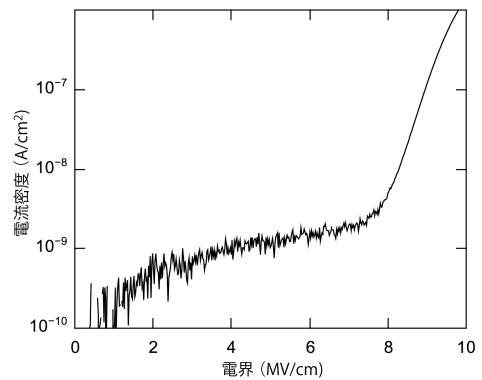


図 2: SiO_2/GaN MOS 構造の電流密度-電界 (J-E) 特性の例

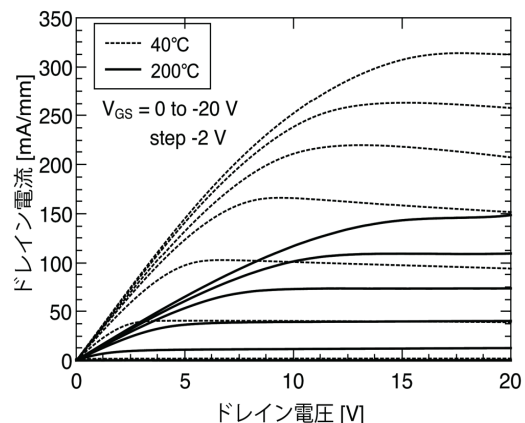
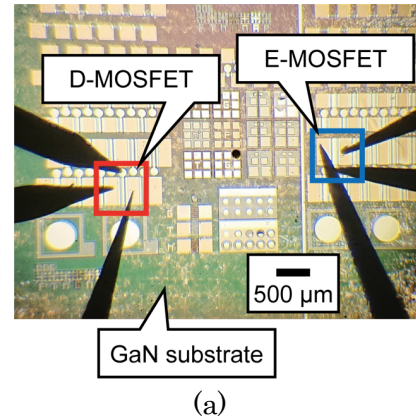


図 3: 作製した AlGaIn/GaN MOS トランジスタの動作特性の例

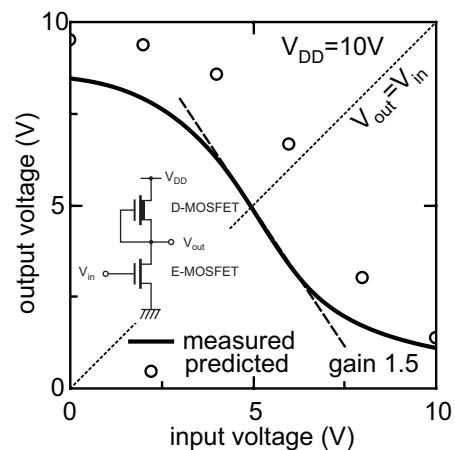
導体中のフォノン散乱などによるキャリア移動度の低下によるものと考えられる。作製した構造では、 SiO_2 ゲート酸化膜の採用により、高温においてもゲートリーク電流の増加の 効果的な抑制が得られた。ここには示していないが、この素子を再び室温に戻して再々度測定を行なったところ、初期の室温測定の結果を再現する結果が得られており、作製した構造が広い温度領域で安定な特性を有していることがわかった。

(3)窒化物半導体モノリシック集積回路の作製・評価と、高温での耐環境性回路動作の検証の試みとして、p-GaN 基板に Si イオン注入技術により選択的に n 型領域を形成し、n チャネル MOS トランジスタを形成した。新たな試みとして、Si イオン注入技術と容量-電圧 (C-V) 法による評価技術を組み合わせた検討から、イオン注入による不純物添加の添加量と GaN-MOS トランジスタの閾値電圧の関係を実験的に評価検討し、デプレッション型 (D 型) MOS トランジスタの作製の基礎的な理論を提案した。この理論に基づいて同一基板上にエンハンスメント型 (E 型) とデプレッション型 MOS トランジスタの作製に成功した。個々のトランジスタの性能改善のための基盤不純物濃度の制御など解決すべき課題も見えたが、E/D 型のインバータ回路を構成し、インバータ回路動作を世界で初めて報告することができ、窒化物半導体のモノリシック集積回路技術の可能性を実証することができた。

研究全体を通して、本課題で提案していた過酷環境で動作する窒化物半導体集積エレクトロニクスのための新規のデバイス作製手法の有用性を実証し、過酷環境エレクトロニクス実現の可能性を示すことができた。



(a)



(b)

図 4: (a)GaN 基板上にイオン注入技術など集積回路技術で試作した E/D 型インバータ回路と、(b)その入出力特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okada Hiroshi, Miwa Kiyomasa, Yokoyama Taichi, Yamane Keisuke, Wakahara Akihiro, Sekiguchi Hiroto	4. 巻 217
2. 論文標題 GaN Based Monolithic Inverter Consisting of Enhancement and Depletion Mode MOSFETs by Si Ion Implantation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 1900550 ~ 1900550
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1002/pssa.201900550	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 中村健人、馬場真人、岡田浩、古川雅一、山根啓輔、関口寛人、若原昭浩
2. 発表標題 基底状態酸素原子を用いた化学気相堆積法で形成した絶縁ゲート型GaN系トランジスタの検討
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会、
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬場真人、垣内佑斗、岡田浩、古川雅一、山根啓輔、関口寛人、若原昭浩
2. 発表標題 基底状態酸素原子を用いた化学気相堆積法によるシリコン酸化膜の窒化物半導体応用
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会、
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三輪清允、横山太一、関口寛人、山根啓輔、若原昭浩、岡田浩
2. 発表標題 集積回路実現に向けた窒化物半導体によるMOSFETの作製
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村健人、馬場真人、岡田浩、古川雅一、山根啓輔、関口寛人、若原昭浩
2. 発表標題 GaN系ヘテロ構造デバイスのイオン注入素子分離
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馬場真人、岡田浩、古川雅一、山根啓輔、関口寛人、若原昭浩
2. 発表標題 窒化物半導体デバイス応用に向けた表面波プラズマ励起化学気相堆積法によるシリコン系絶縁膜の検討
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Okada, M. Baba, M. Furukawa, K. Yamane, H. Sekiguchi, and A. Wakahara
2. 発表標題 Characteristics of Silicon Dioxide Dielectric Film Formed by Chemical Vapor Deposition Enhanced by Atomic Oxygen at Ground State Extracted from a Surface-wave Generated Plasma
3. 学会等名 2017 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 馬場 真人、中村 健人、岡田 浩、古川 雅一、山根 啓輔、関口 寛人、若原 昭浩
2. 発表標題 表面波プラズマ励起化学気相堆積法によるシリコン酸化膜の堆積と評価(2)
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横山 太一、三輪 清允、岡田 浩、関口 寛人、山根 啓輔、若原 昭浩
2. 発表標題 イオン注入法による窒化物半導体の電気的特性の制御と集積回路への応用の検討(2)
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増田 海斗、関口 寛人、三輪 清允、岡田 浩、山根 啓輔、若原 昭浩
2. 発表標題 2波長励起フォトルミネッセンス法によるGaNへのイオン注入ダメージ評価の検討
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H.Okada, M. Baba, K. Nakamura, M. Furukawa, K.Yamane, H.Sekiguchi and A.Wakahara
2. 発表標題 Fabrication of AlGa _N /Ga _N transistors with SiO ₂ gate insulator formed by atomic oxygen at ground state extracted from a surface-wave generated plasma
3. 学会等名 13th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroto Sekiguchi , Kiyomasa Miwa , Keisuke Yamane , Akihiro Wakahara , Hiroshi Okada
2. 発表標題 Ga _N -based Inverter by Monolithic Integration of Threshold Controlled MOSFETs
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田 浩 , 横山太一 , 三輪清允 , 山根啓輔 , 若原昭浩 , 関口寛人
2. 発表標題 窒化物半導体集積回路プロセスの検討 ~ Siイオン注入による閾値制御の試み ~
3. 学会等名 電子情報通信学会 研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考